DOI:10.11918/202409016

超大跨径公铁两用桥斜拉索疲劳荷载模型分析

赵 煜[1],贾梦怡[1],周勇军[1],药天运[2,3,4,5],陈鹏宇[1],侯培源[1]

(1.长安大学 公路学院,西安 710064;2.长安大学 建筑工程学院,西安 710061;3.北京科技大学 未来城市学院 城镇化与城市安全研究院,北京 100083;4.中交第一公路勘察设计研究院有限公司,西安 710075;5.西安桥邦工程检测有限公司,西安 710086)

摘 要:为解决超大跨径公铁两用斜拉桥拉索疲劳问题,采用仿真与理论分析相结合的方式进行斜拉索疲劳荷载模型研究。首先,基于车流数据拟合结果,采用蒙特卡洛法生成公路随机车流,确定了公路荷载;对于铁路荷载,调研常州站铁路列车运行状况,确定了铁路列车荷载,并将其作为铁路疲劳荷载模型。其次,建立常泰长江大桥有限元模型,以上游侧八根斜拉索为研究对象,进行斜拉索影响面分析,计算出了斜拉索在车辆及列车作用下应力历程及等效应力幅。同时,将公路随机车流与列车荷载共同作用下的等效应力幅,与仅有列车荷载作用下的等效应力幅进行了对比分析,研究公路荷载对公铁两用桥梁疲劳效应的影响。最后,编制了公路疲劳荷载谱,提出公路标准疲劳车模型。分析结果表明:对于公铁两用桥,同时考虑公路与铁路荷载计算的等效应力幅大于仅考虑铁路荷载的等效应力幅,两者相差34.23%,在进行桥梁疲劳效应分析时,不可忽略公路荷载的影响;同时,编制的公路疲劳荷载谱与列车荷载作用的疲劳效应为公路随机车流与列车荷载计算结果的1.12倍,表明编制结果较为准确。计算结果表明,常泰长江大桥斜拉索具有较好的疲劳性能,研究成果可用于该地区超大跨径公铁两用桥梁斜拉索的疲劳计算,同时,此研究方法也可为其他超大跨径桥梁疲劳荷载模型的研究提供参考。

关键词:超大跨径桥梁;公铁两用斜拉桥;影响面;等效应力幅;随机车流;疲劳荷载模型

中图分类号:U442.5 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2026)07-0135-15

Analysis of fatigue load models for stayed cables of ultra-long span rail-road combined bridges

Zhao Yu[1], Jia Mengyi[1], Zhou Yongjun[1], Yao Tianyun[2,3,4,5], Chen Pengyu[1], Hou Peiyuan[1]

(1. School of Highway, Chang′an University, Xi′an 710064, China; 2. School of Civil Engineering, Chang′an University, Xi′an 710061, China; 3. Research Institute of Urbanization and Urban Safety, School of Future Citys, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 4. CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi′an 710075, China; 5. Xi′an Qiao Bang Engineering Inspection Co., Ltd., Xi′an 710086, China)

Abstract: In order to solve the fatigue problem for stayed cables of rail-road cable-stayed bridges with utra-long span, this paper adopts a combination of simulation and theoretical calculation to study the fatigue load model of stayed cables. Firstly, bases on the fitting result of traffic flow datas, the Monte-Carlo method is used to generate random traffic flow on the highway and determine the load of the highway; For railway load, the operation status of railway trains at Changzhou Station is investigated, and the railway train load is determined as the railway fatigue load model. Secondly, a finite element model of the Changtai Yangtze River Bridge is established, with eight stayed cables on the upstream side as the research object. The influence surface of the stayed cables is analyzed, and the stress history and equivalent stress amplitude of the stayed cables under the action of highway and railway loads are calculated. At the same time, a comparative analysis is conducted between the equivalent stress amplitude under the combined action of random traffic flow and railway load and the equivalent stress amplitude under the action of only railway load, to study the influence of highway load on the fatigue effect of rail-road bridges. Finally, a fatigue load spectrum for highway is developed, and a standard fatigue vehicle model for highway is proposed. Analysis shows that for rail-road bridges, the equivalent stress amplitude calculated by considering both highway and railway load is greater than that calculated by considering only railway load, the difference between the two is 34.23%. Therefore, the influence of highway load cannot be ignored when conducting fatigue effect analysis of bridges. At the same time, the fatigue effect of the compiled highway fatigue load spectrum and train load is 1.12 times that of

收稿日期:2024-09-06;**录用日期**:2024-09-30;**网络首发日期**:2025-03-14
网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20250314.1033.002
基金项目:国家重点研发计划(2021YFB1600300)
作者简介:赵 煜(1974—),男,教授,博士生导师
通信作者:药天运,yao_yao2021@chd.edu.cn

the calculation results of random traffic flow and train load on the highway, indicating that the compilation result is relatively accurate. Finally, calculations show that the inclined stayed cables of Changtai Yangtze River Bridge have good fatigue performance. The research results of this article can be used for fatigue calculation for stayed cables of rail-road cable-stayed bridges with utra-long span in this region. At the same time, the research method of this article can also provide ideas for the study of fatigue load models of other ultra-long span bridges.

Keywords: utra-long span bridges; rail-road cable-stayed bridges; influence surface; equivalent stress amplitude; random traffic flow; fatigue load mod

在超大跨径桥梁中,公铁两用斜拉桥作为一类较为特殊的桥梁,在工程实践中备受关注。斜拉索作为斜拉桥的关键受力构件,其疲劳性能影响着桥梁结构整体的安全性,而公铁两用斜拉桥的斜拉索疲劳问题更为突出[1-2]。目前国内外学者针对公铁两用超大跨径斜拉桥斜拉索疲劳荷载模型的研究成果相对较少,因此开展对其疲劳荷载模型的研究对于保证公铁两用桥梁的安全性具有重大意义。

公路桥梁凭借其更为复杂的交通荷载情况以及更大的荷载随机性成为桥梁疲劳荷载模型研究领域的重点,众多学者对公路桥梁的疲劳荷载模型展开研究。郁胜[3]编制出了疲劳荷载谱,建立随机过程模型来描述车流行为。吕志林等[4]计算出各种车型的等效疲劳车辆荷载模型,提出了区域适用的标准疲劳车。郭雪莲等[5]采用改进 k-means 聚类算法得到 11 种交通流荷载。外国学者对于疲劳荷载模型的研究开展早于中国,Fisher 等[6]在上世纪的 70 年代即对钢结构的疲劳展开研究,通过疲劳破坏实验发现了结构疲劳裂纹产生的条件是任意应力循环超过某限值,自此,许多学者开始通过等效疲劳车对疲劳设计问题进行简化。Schilling 等[7-8]为了提高等效疲劳车的计算精度,对其轴重与总重进行了调整。Gagarin 等[9]得出一种疲劳车模型,并利用实测桥梁应变对其校准优化。Laman 等[10]提出了建议常规地区所采用的 3 轴车和 4 轴车模型。Chotickai 等[11]提出对典型公路与重载公路适应性较高的 3 轴车与 4 轴车疲劳荷载模型。Przemyslaw[12]推导出了用于结构可靠度分析与疲劳可靠度分析的车辆荷载谱和车辆荷载模型。

对于铁路桥梁的疲劳荷载模型的研究则相对较少。肖鑫等[13-14]结合蒙特卡洛与有限元分析钢桁梁桥疲劳应力谱,计算疲劳可靠性变化,探讨荷载变异性影响,用 β 约界与静力法研究系统疲劳可靠性。晏铖等[15]按照线性疲劳累积损伤准则,对斜拉索的疲劳寿命进行了计算,采用蒙特卡洛法模拟斜拉桥疲劳寿命的概率分布,建立了拉索疲劳寿命模型,研究了钢丝根数对拉索疲劳寿命的影响,计算了铁路荷载作用下该斜拉桥的拉索寿命。Frøseth 等[16]推导出适用于评价挪威铁路桥疲劳寿命的荷载模型,同时验证了其可行性。Croce[17]补充了损伤等效系数和公式,反映货车体积对疲劳损伤的影响,指出了基于传统线性疲劳强度计算假设的局限性。Mariia 等[18]通过开发一种新的动态称重测量通道系统,并通过该系统对铁路疲劳荷载模型进行了校准与标定。Maljaars[19-20]将欧洲规范 EN 1991-2 和 EN 1993-2 中的 Lambda 疲劳荷载与动态称重实测数据对比分析,表明了规范荷载模型的不准确性,引入与影响线的形状及跨长相关的参数以及动力放大系数来对规范荷载模型进行了改良,使其能够考虑未来列车轴重和速度变化所带来的影响。

除了公路桥与铁路桥外,公铁两用桥梁的疲劳荷载及其作用下的疲劳问题也有学者对其进行了研究。曹珊珊等[21]分析多车道公路和多线铁路疲劳荷载谱,讨论疲劳荷载效应组合方法,借助有限元分析软件和 MATLAB 数据处理平台,确定了大跨度公铁两用桥梁索锚结构的疲劳荷载效应。吴斌斌[22]建立了某公铁两用斜拉桥全桥有限元模型,结合雨流计数法与 Miner 线性损伤累积准则计算典型索塔锚固构造在公、铁路疲劳荷载作用 200 万次下的等效疲劳索力幅,并对两者组合方式进行讨论研究。朱志远[23]基于公路实测车流数据与铁路主要列车类型及其监测数据,分别建立公路部分的随机车流荷载模型与铁路部分的列车荷载模型,并借助限元手段模型及索力监测数据验证了两部分荷载模型的准确性,基于 S-N 曲线的疲劳线性累计损伤理论与常幅疲劳设计准则计算了斜拉索的疲劳寿命。但相对而言,公铁两用桥梁的疲劳荷载模型的研究内容相对较少,特别是对于超大跨径的斜拉桥来说,研究内容则更为匮乏。

虽然有较多的学者进行了关于疲劳荷载模型的研究,同时中国现行规范中有 3 种可供选择的疲劳荷载模型,并且适用于不同情况和构件下的疲劳设计计算,但疲劳荷载模型研究仍然存在以下问题:1)中国现行规范[24]中的疲劳荷载模型数据虽然来源较广,但为了兼顾各地的桥梁和交通状况,难免会忽略桥梁结构自身特性和车辆荷载的地域特性,对某一具体地区的桥梁而言,规范规定的疲劳荷载模型是否具有适应性还值得探讨;2)国内外学者对疲

劳荷载模型的研究主要针对中小跨径桥梁，研究较早，交通状况与目前形势存在差异，并且目前越来越多桥梁所承受的荷载早已超出设计荷载；3）目前对于疲劳荷载模型的研究，虽然也有学者对公铁两用桥梁进行疲劳研究，但多是针对其疲劳效应开展研究的，较少学者对于公铁两用桥梁的疲劳荷载模型进行分析。本文以依托常泰长江大桥（大桥主跨 1 176 m，为世界级超大跨径公铁两用斜拉桥）对斜拉索疲劳荷载模型开展研究，研究思路与成果可为桥址处附近的其他该类桥梁斜拉索的疲劳寿命的精确分析提供一种理论方法，提高桥梁设计计算的可靠性，为延长中国桥梁的服役寿命提供技术支撑。

1　公路车辆分车道车流拟合

目前，国内外较多学者均已指出，汽车荷载与地区有着较大的相关性，不同地区的荷载状况差异较大，特别是经济较为发达的东南沿海地区[25]。因此，在进行公路疲劳荷载模型研究时，本文所采用的车流数据为桥址附近某大桥 2022 年 6 月份的实测车流数据，实测车流数据来源于某双向 6 车道桥梁，车道布置图如图 1 所示，本节将对实测车流数据进行统计分析。其中，由于车重、轴距与轴重属于车辆本身属性，与车辆类型高度相关，因此在对这几类参数进行拟合时对样本整体进行拟合，未进行分车道处理。而对于车型、车速以及车头间距等参数，由于其与道路等级、功能等因素高度相关，则进行了分车道分布拟合。

1.1　车型

根据动态称重系统（WIM）实测车流数据统计得到车型比例如表 1 所示。

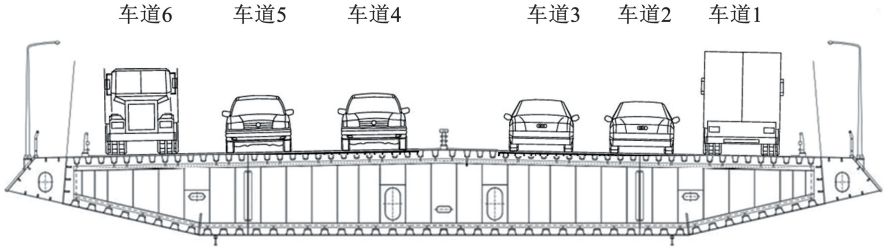


图 1　车道分布

Fig. 1　Lane distribution map

表 1　动态称重实测车流数据车型占比

Tab. 1　Dynamic weighing actual traffic flow data, proportion of vehicle models

车型	2 轴车	3 轴车	4 轴车	5 轴车	6 轴车
占比/%	66.12	3.88	6.31	4.34	19.35

由表 1 可知：2 轴车为主要车型，其次为 6 轴车，占比近 1/5。

在车流数据采集时，车道 6 交通管制未开放，仅对车道 1 至车道 5 数据进行采集，结果见表 2。

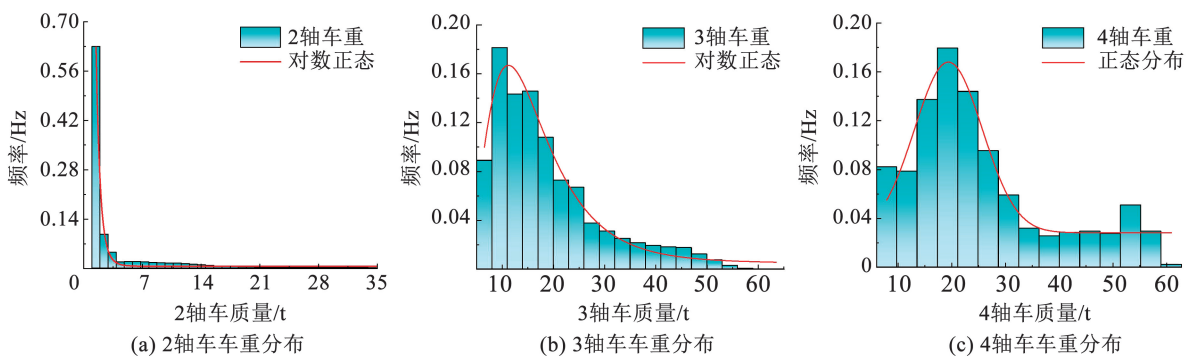
1.2　车重

在分析过程中，车重属于车辆本身的属性，故对车重进行统计分布时进行样本整体统计，不进行分车道处理得到结果如图 2 所示。

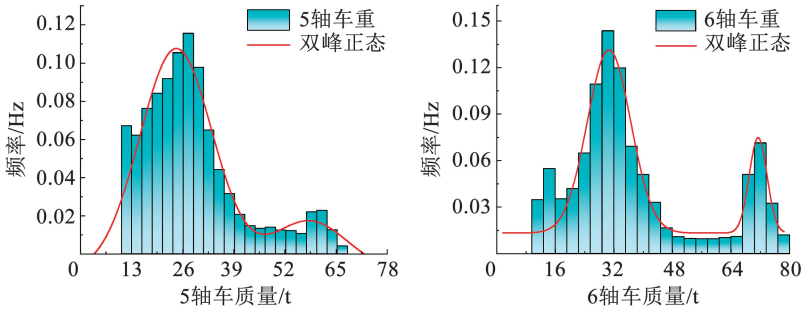
表 2　各车道车型占比

Tab. 2　Proportion of vehicle models in each lane

车道	不同车型占比/%				
	2 轴车	3 轴车	4 轴车	5 轴车	6 轴车
车道 1	28.91	6.01	11.23	9.72	44.12
车道 2	46.22	7.43	10.91	6.31	29.25
车道 3	99.23	0.24	0.32	0.13	0.21
车道 4	99.24	0.22	0.24	0.12	0.33
车道 5	55.42	5.12	8.53	6.01	25.02



(a) 2轴车车重分布　(b) 3轴车车重分布　(c) 4轴车车重分布



(d) 5轴车车重分布　　(e) 6轴车车重分布

图 2　各车型车重分布拟合

Fig. 2　Fitting of vehicle weight distribution for each model

对拟合分布进行 K-S 检验,均在显著性水平取 0.05 时通过检验,同时通过各拟合分布相关系数 R^2 评价拟合程度,计算结果如表 3 所示,各拟合分布的 R^2 均大于 0.9,拟合效果较好。

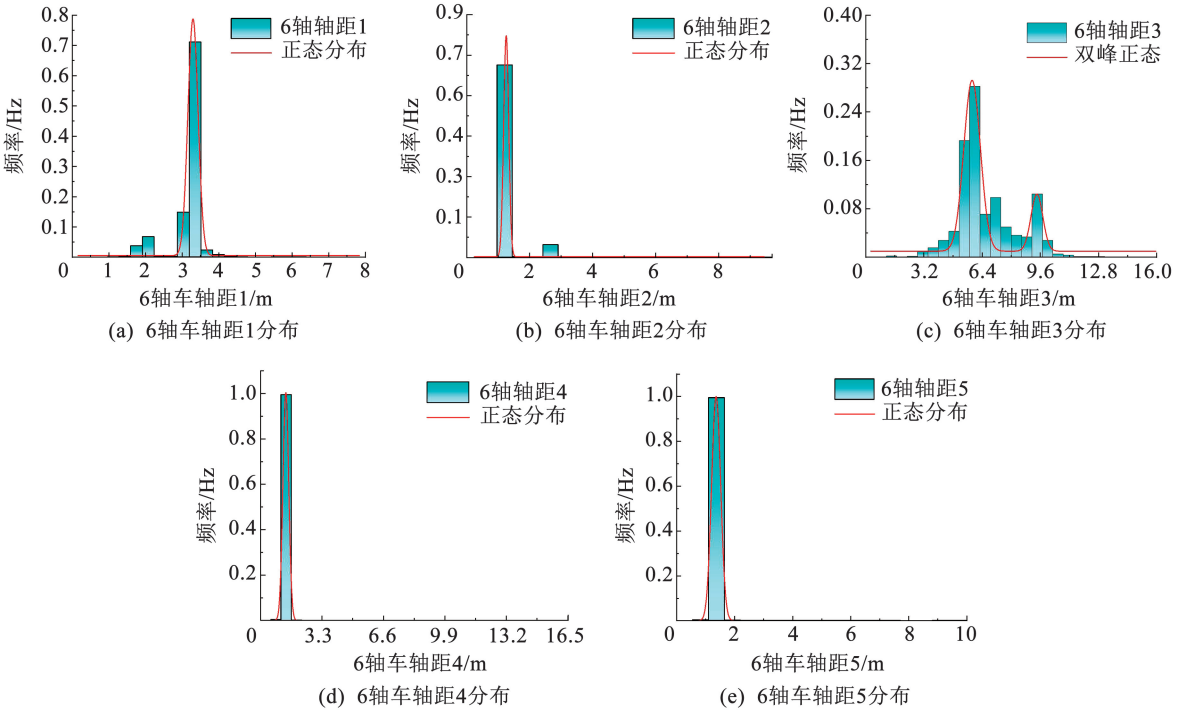
表 3　各车型车重拟合相关系数

Tab. 3　Correlation coefficient of vehicle weight fitting for each vehicle model

车型	分布类型	R^2
2 轴车	对数正态分布	0.995 11
3 轴车	对数正态分布	0.969 91
4 轴车	正态分布	0.919 23
5 轴车	双峰正态分布	0.927 11
6 轴车	双峰正态分布	0.911 23

1.3　轴距

对轴距进行样本整体统计,将不同车型的轴距分布进行拟合,得到的拟合结果如图 3 所示,仅以 6 轴车轴距分布拟合结果为例。



(a) 6轴车轴距1分布　(b) 6轴车轴距2分布　(c) 6轴车轴距3分布

(d) 6轴车轴距4分布　(e) 6轴车轴距5分布

图 3　各车型轴距分布拟合

Fig. 3　Fitting of wheelbase distribution for each vehicle model

在显著性水平取 0.05 时,各车型轴距拟合分布均通过了 K-S 检验,各拟合分布的相关系数 R^2 结果如表 4 所示,仅展示 6 轴车结果,各拟合分布的 R^2 均大于 0.9,拟合效果较好。

表 4　6 轴车轴距拟合相关系数

Tab. 4　Correlation coefficient of wheelbase fitting for each vehicle modelof 6-axle vehicle

轴距	分布类型	R^2
轴距 1	正态分布	0.987 79
轴距 2	正态分布	0.994 97
轴距 3	双峰正态分布	0.903 14
轴距 4	正态分布	0.997 98
轴距 5	正态分布	0.998 65

1.4　轴重

对车辆轴重进行样本整体统计,将不同车型的轴重分布进行拟合,得到的拟合结果如图 4 所示,仅展示 6 轴车为例进行说明。

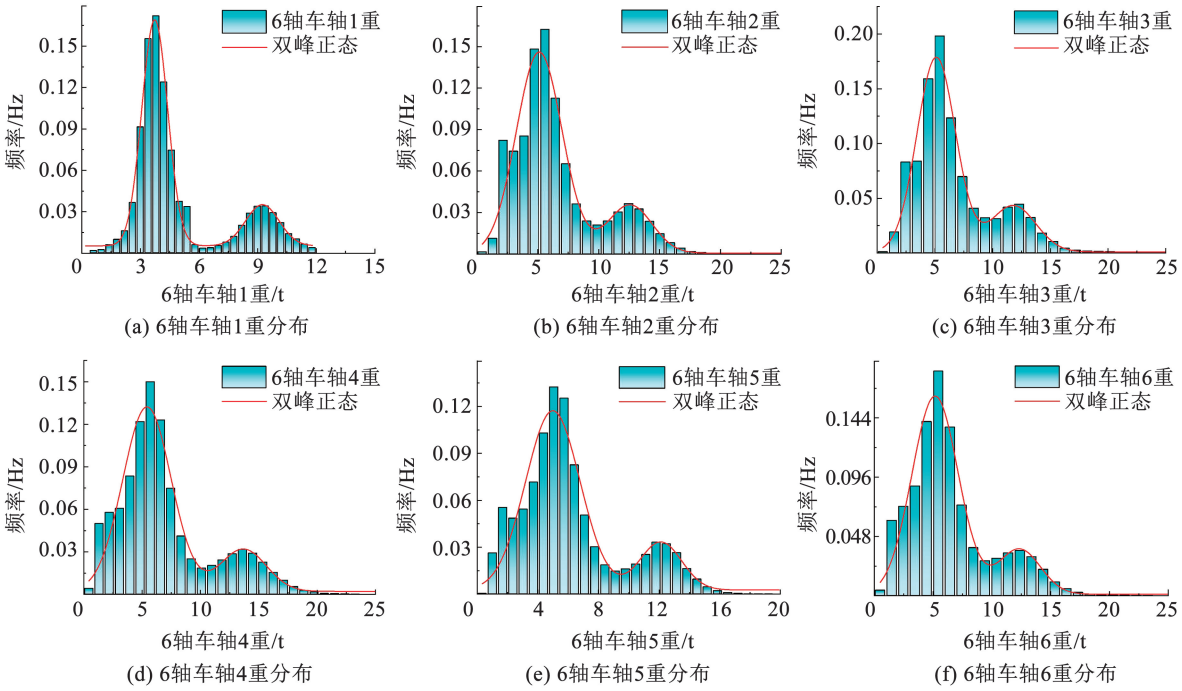


图 4　各车型轴距分布拟合

Fig. 4　Fitting of wheelbase distribution for each vehicle model

显著性水平取 0.05 时，各车型轴重拟合分布均通过 K-S 检验，各拟合分布相关系数 R^2 如表 5 所示，仅展示 6 轴车结果，各拟合分布的 R^2 均大于 0.9，拟合效果较好，具体结果如表 5 所示。

表 5　6 轴车轴重拟合相关系数

Tab. 5　Correlation coefficient for axle load fitting of 6-axle vehicle

轴重	分布类型	R^2
轴重 1	双峰正态分布	0.984 11
轴重 2	双峰正态分布	0.928 93
轴重 3	双峰正态分布	0.959 78
轴重 4	双峰正态分布	0.938 11
轴重 5	双峰正态分布	0.916 45
轴重 6	双峰正态分布	0.953 93

1.5　车速

通常情况下，不同的车道承担不同的功能，且有最低车速或最高车速的限制，因此应区分不同车道来进行，各车道的车速分布拟合结果如图 5 所示。

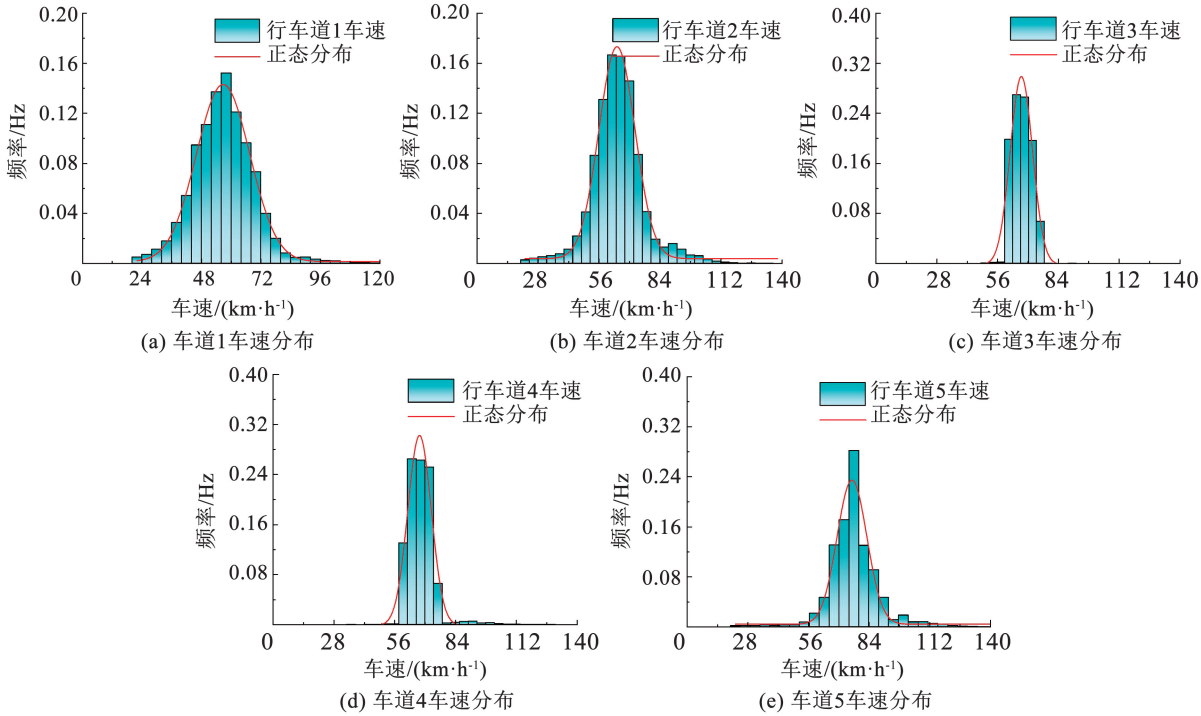


图 5　各车道车速分布拟合

Fig. 5　Proposed speed distribution for each lane

显著性水平取 0.05 时,各车道车辆的车速拟合分布均通过 K-S 检验,各拟合分布相关系数 R^2 见表 6,各拟合分布的 R^2 均大于 0.9,拟合效果较好。

表 6 各车道车速拟合相关系数

Tab. 6 Correlation coefficient of vehicle speed fitting for each lane

车道	分布类型	R^2
车道 1	正态分布	0.994 18
车道 2	正态分布	0.993 68
车道 3	正态分布	0.968 63
车道 4	正态分布	0.967 19
车道 5	正态分布	0.943 03

1.6 车头间距

在 WIM 实测数据中,并不能直接反应车距信息,因此通过以下方法进行车头距计算:

1)获取车辆到达时间以及通过测点的速度,并按照车辆到达时间,即到达顺序进行排列。

2)假设车辆车速不变,将第 k 辆车达到测点的时刻记作 t_k,车速记作 v_k,则第 $k+1$ 辆车到达测点的时刻为 t_{k+1},车速为 v_{k+1},则可第 $k+1$ 辆车与第 k 辆车之间的车头距为

$$L_k = v_k \times (t_{k+1} - t_k) \tag{1}$$

3)依据上述式则可计算出各车辆之间车头间距,并依照车辆到达顺序进行排列。

由于车头间距也与车速相关,也应对各个车道进行独立拟合,拟合结果如图 6 所示。

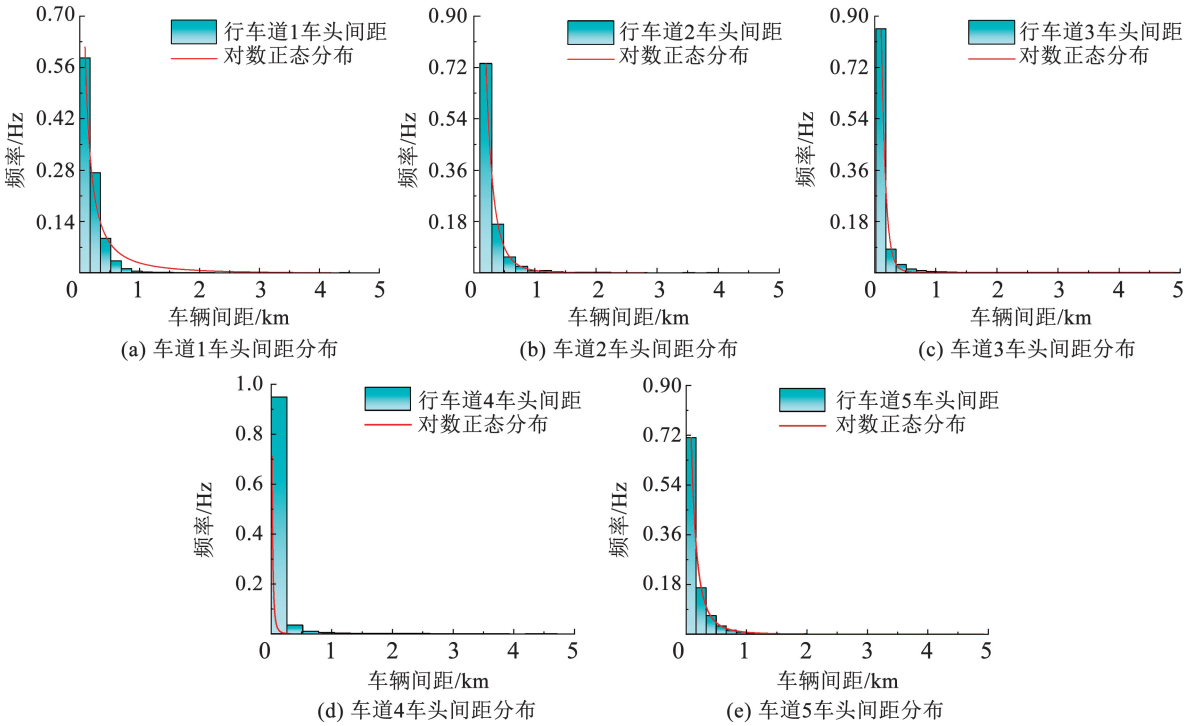


图 6 各车道车头间距分布拟合

Fig. 6 Fitting of the distance distribution between vehicle heads in each lane

显著性水平取 0.05 时,各车道车辆之间车头间距的拟合分布均通过 K-S 检验,各拟合分布相关系数 R^2 结果见表 7,R^2 均大于 0.9,拟合效果较好。

表 7 各车道车速拟合相关系数

Tab. 7 Correlation coefficient of vehicle speed fitting for each lane

车道	分布类型	R^2
车道 1	对数正态分布	0.970 43
车道 2	对数正态分布	0.999 96
车道 3	对数正态分布	0.999 33
车道 4	对数正态分布	0.999 93
车道 5	对数正态分布	0.999 92

2 基于随机车流模拟的公铁两用斜拉桥斜拉索应力分析

2.1 工程背景

本文依托工程为常泰长江大桥,孔跨布置为 142 m + 490 m + 1 176 m + 490 m + 142 m = 2 440 m。大桥为双塔斜拉桥,拉索采用双索面布置,桥塔单侧设置 39 对拉索,全桥共 312 根斜拉索。斜拉索编号及大桥的立面结构如图 7 所示。大桥主梁采用箱桁组合结构分为上下两层,主梁横截面结构如图 8 所示。

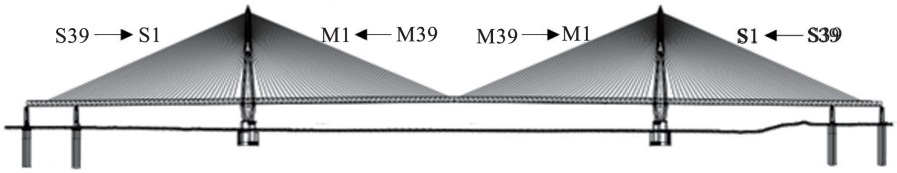


图 7　常泰长江大桥立面结构

Fig. 7　Facade structure of Changtai Yangtze River Bridge

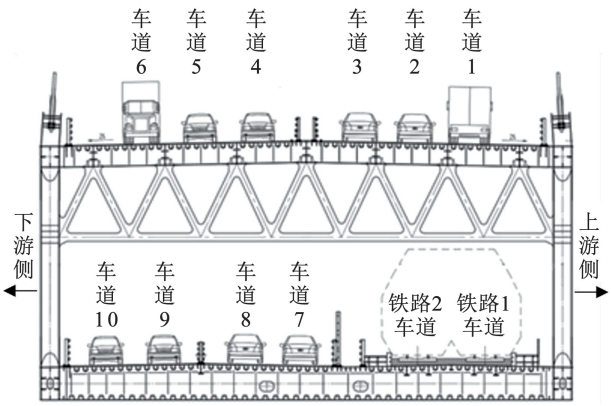


图 8　常泰长江大桥主梁横截面结构

Fig. 8　Cross section structure of the main beam of Changtai Yangtze River Bridge

2.2　公路随机车流模拟结果

在进行随机车流生成时，利用 MATLAB 编写程序生成需要模拟的各个车道公路随机车流，公路随机车流程序的模拟流程如图 9 所示。

常泰大桥车道 1 至车道 3 为上行慢车道、中间车道与快车道，车道 4 至车道 6 为下行快车道、中间车道与慢车道，车道 1 至车道 4 的功能与实测数据中车道情况相符，因此大桥车道 1 至车道 4 匹配实测数据中的对应车道进行抽样模拟。但由于实测数据中的车道 5 由于车道 6 的临时封堵，兼具了下行中间车道与慢车道功能，与常泰长江大桥情况不同，在模拟车道 5 与车道 6 时，采用分别将实测数据中车道 2、车道 1 的车速、车型与实测数据中车道 5 的车头距组合的方式进行模拟。对于大桥的车道 7 至车道 10，为双向四车道，本文认为其中车道 7 以及车道 10 与实测数据的车道 5 功能相似，均可看作慢车道与中间车道相结合，大桥的车道 8 与车道 9 为快车道。因此在对大桥的车道 8 至车道 10 模拟时，匹配实测车流中的车道 3 至车道 5 进行模拟，而对于车道 7 也匹配实测车流中的车道 5 进行模拟。对时长为一年的随机车流进行模拟，模拟生成的车流车辆总计 21 044 500 辆，所得各车道的车流数量及车型占比见表 8 和表 9，并截取部分随机车流，以车道 1 ~ 3 为例，绘制车型示意图如图 10 所示，图例中 C2、C3、C4、C5、C6 代表 5 种车型。根据所生成车流车型占比与实测车流数据比较可知，公路随机车流模拟效果较好，能够反映实际情况。

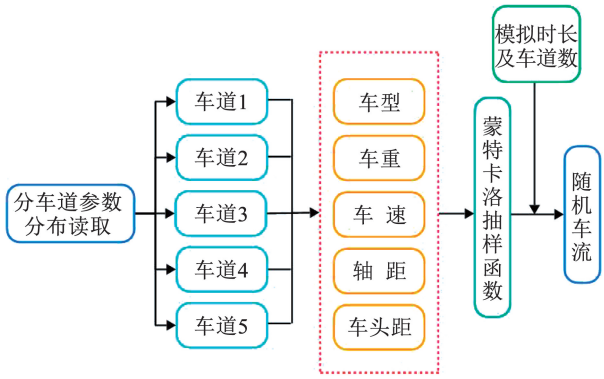


图 9　公路随机车流模拟流程

Fig. 9　Simulation process of random traffic flow on highways

表 8　一年内随机车流各车道车型数量

Tab. 8　Number of vehicle types in each lane of random traffic flowwithin one year

车道	不同车型数量/辆					合计数量/辆
	2 轴车	3 轴车	4 轴车	5 轴车	6 轴车	
车道 1	457 420	94 563	173 417	151 426	693 984	1 570 810
车道 2	1 041 025	167 458	248 818	135 678	660 811	2 253 790
车道 3	2 851 215	5 746	8 619	1 149	6 321	2 873 050
车道 4	2 822 988	5 404	8 817	853	6 257	2 844 319
车道 5	1 031 927	172 559	237 154	160 005	680 876	2 282 521
车道 6	434 879	89 131	190 269	150 553	674 562	1 539 394
车道 7	875 658	82 463	138 387	98 735	384 512	1 579 755
车道 8	2 245 815	4 297	5 654	678	5 202	2 261 646
车道 9	2 242 896	4 523	6 784	452	6 784	2 261 439
车道 10	873 614	80 782	135 058	94 982	393 340	1 577 776

表 9 随机车流各车道车型占比情况

Tab. 9 Proportion of vehicle types in each lane of random traffic flow

车道	不同车型占比/%				
	2 轴	3 轴车	4 轴车	5 轴车	6 轴车
车道 1	29.12	6.02	11.04	9.64	44.18
车道 2	46.19	7.43	11.04	6.02	29.32
车道 3	99.24	0.20	0.30	0.04	0.22
车道 4	99.25	0.19	0.31	0.03	0.22
车道 5	45.21	7.56	10.39	7.01	29.83
车道 6	28.25	5.79	12.36	9.78	43.82
车道 7	55.43	5.22	8.76	6.25	24.34
车道 8	99.30	0.19	0.25	0.03	0.23
车道 9	99.18	0.20	0.30	0.02	0.30
车道 10	55.37	5.12	8.56	6.02	24.93

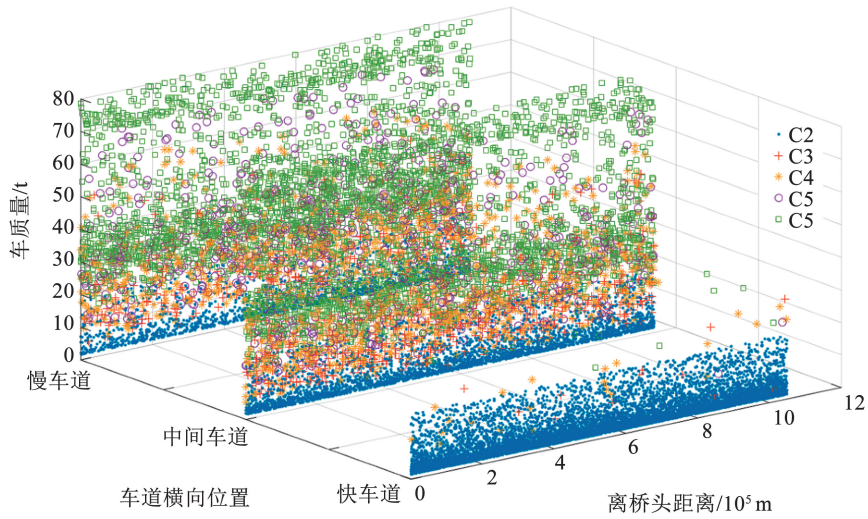


图 10 随机车流车型示意

Fig. 10 Random traffic flow model diagram

2.3 铁路列车荷载模拟

通过查询常州站列车到达时刻表可知，常州站单日列车到达数量可达 451 辆，目前有 3 条铁路线运行，假定单线日均列车运行数即为 150 车次。

对常州—泰兴列车情况进行调查，主要列车车型为复兴号 CR400BF-A-3094 列车，荷载模型如图 11所示，采用该荷载模型作为铁路荷载模型，与公路随机车流共同加载来进行后续研究分析。由于铁路列车的运行情况较为固定，因此本文同时也将此模型作为铁路列车疲劳荷载模型。

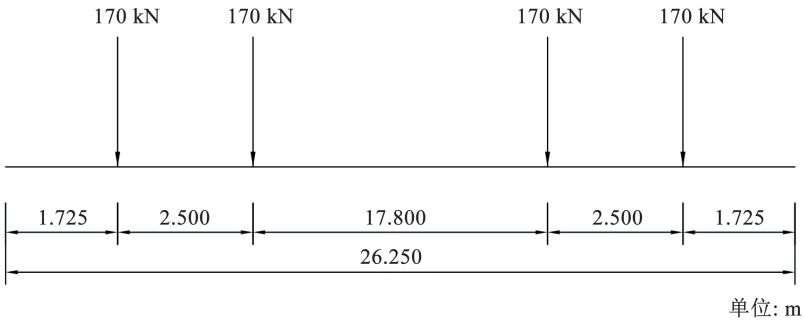


图 11 列车编组荷载示意

Fig. 11 Schematic diagram of train formation load

2.4　斜拉索影响面分析

由于大桥上游侧为城际铁路运行侧，所承受荷载较大，选取上游侧边跨的 S39、S26、S13 及 S1 号与中跨的 M1、M13、M26、M39 号共 8 根斜拉索作为研究对象进行后续分析，而且进行影响面计算时此 8 根拉索的受力差距较大，这 8 根斜拉索在大桥上的位置情况如图 12 所示。

文本使用有限元软件 Midas Civil 对常泰长江大桥进行建模，全桥共建立 8 180 个节点，11 050 个单元，全桥有限元模型如图 13 所示。

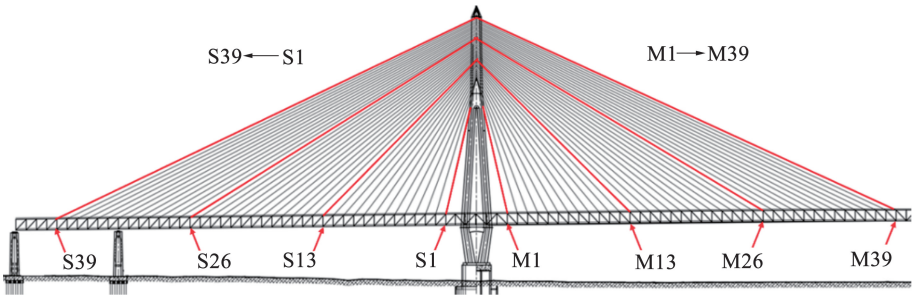
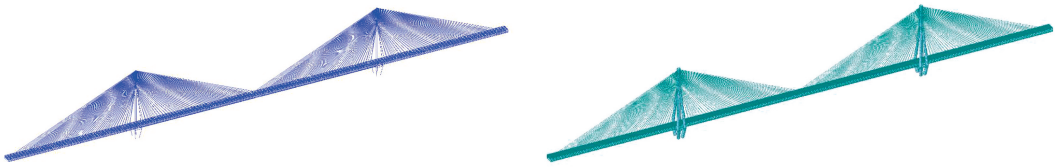


图 12　斜拉索位置情况

Fig. 12　Position of inclined cable

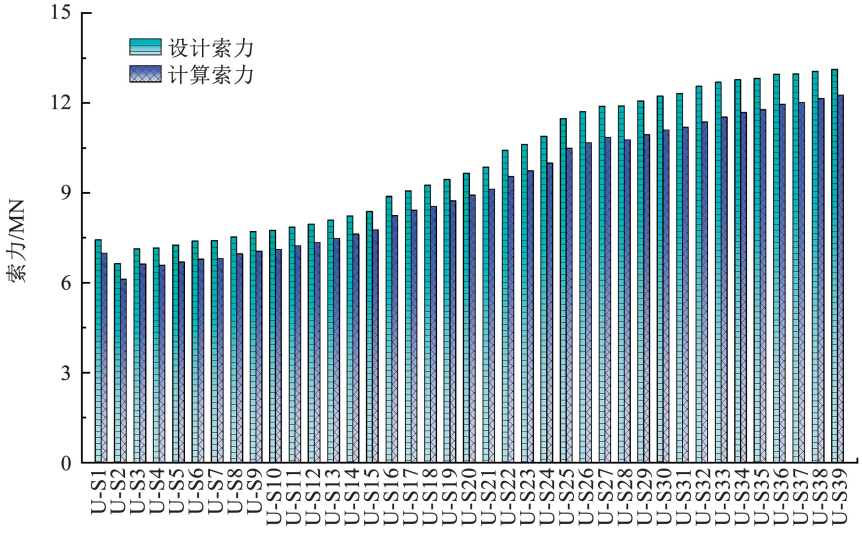


(a) 桥梁单元节点模型　　(b) 桥梁消隐模型

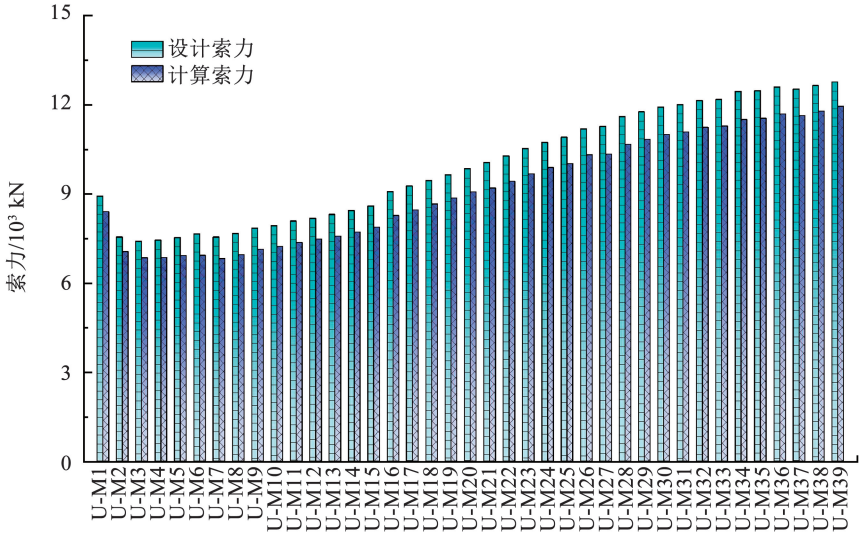
图 13　常泰长江大桥全桥模型

Fig. 13　Changtai Yangtze River Bridge Full Bridge Model

在建立好全桥模型后，进行调索寻找合理成桥状态，经过调索后各根斜拉索的计算索力与设计索力误差均小于 10%，经研究，该误差产生的主要原因为超大跨径公铁两用斜拉桥本身属于高次超静定结构，采用不同的有限元建模方法和目标索力优化方法，所得的索力值会有所不同，可认为计算索力误差在合理范围之内，计算结果如图 14 所示。



(a) 上游边跨拉索索力对比

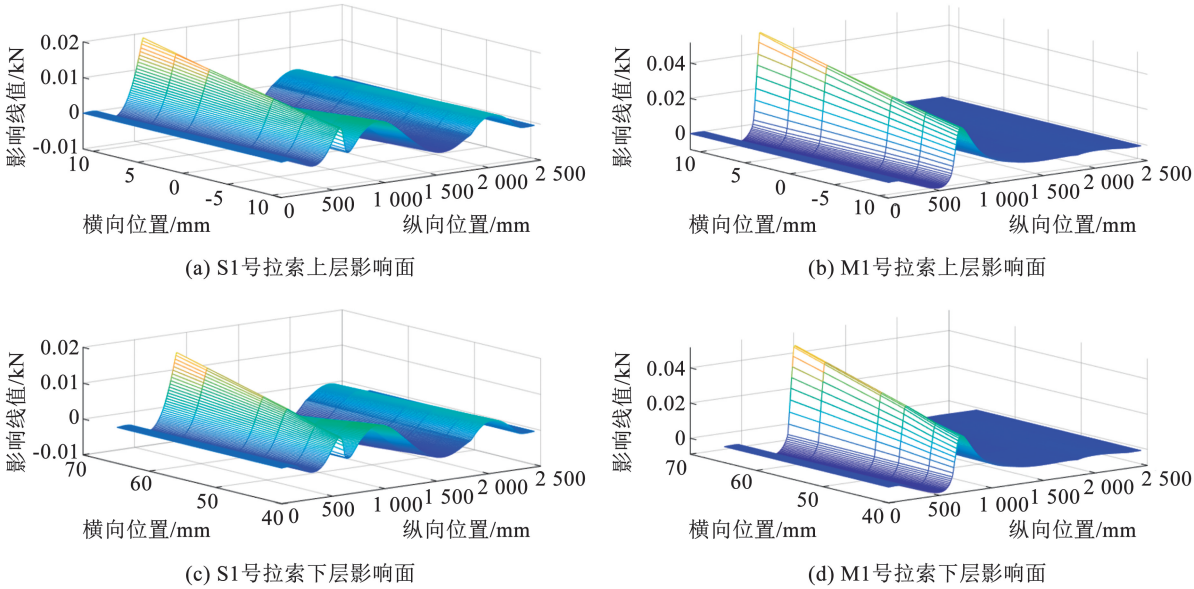


(b) 下游边跨拉索索力对比

图 14　设计索力与计算索力结果对比

Fig. 14　Comparison of Design Cable Force and Calculation Cable Force Results

由于斜拉桥柔性较大,同一斜拉索的内力影响线受车道的影响较大,因此本文采用影响面加载的方式进行。为获取更为准确全面的斜拉索效应值,本文采用拉格朗日插值法对影响面进行插值加密。为节省篇幅,本文绘制 S1 和 M1 的结果,如图 15 所示,图中横向位置 11.125 m 至 −11.125 m 依次为公路车道 1 至公路车道 6,横向位置 64.825 m 至 40 m 依次为铁路 1 车道、铁路 2 车道、以及公路车道 7 至公路车道 10。



(a) S1号拉索上层影响面　(b) M1号拉索上层影响面

(c) S1号拉索下层影响面　(d) M1号拉索下层影响面

图 15　常泰长江大桥斜拉索索力影响面

Fig. 15　Influence surface of cable force on the inclined cables of Changtai Yangtze River Bridge

由各根斜拉索影响面的计算结果可知:上游侧位置处对应影响线量值整体要大于下游一侧,说明车道变化也会导致斜拉索效应的变化。同时在对比各根拉索内力的上下层主梁影响面可知,上层桥面的影响面量值也整体略大于下层桥面,该原因可能是斜拉索锚固点位于主桁竖腹杆的上端部,使得斜拉索的内力对于上层主梁的荷载更为敏感。另外也可看出中跨拉索的影响线值整体高于边跨拉索的影响线值,且长索的影响线值高于短索。

2.5　公路铁路荷载加载分析

编写 MATLAB 程序进行公路随机车流的影响面加载，为了兼顾准确性与计算效率，控制加载时间步为 20 s。假定公路随机车流中车辆及列车的速度保持不变，车队每行进 20 s 即进行一次计算，程序计算流程如图 16 所示。

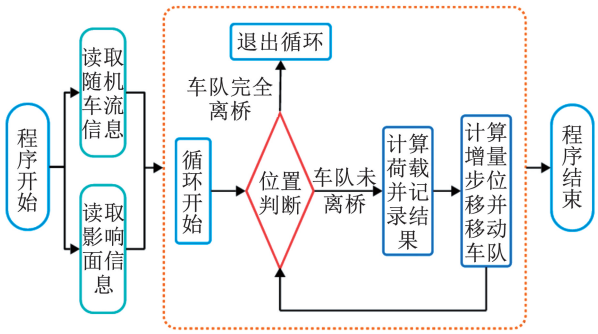
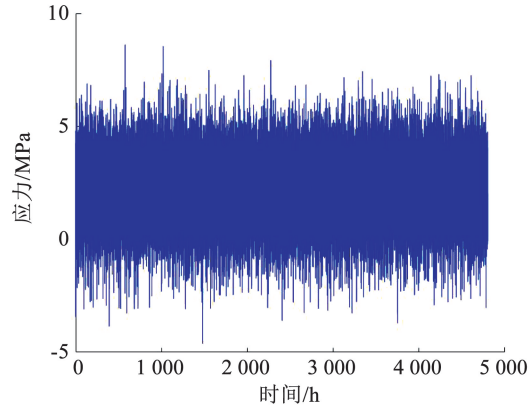


图 16　随机车流加载计算流程

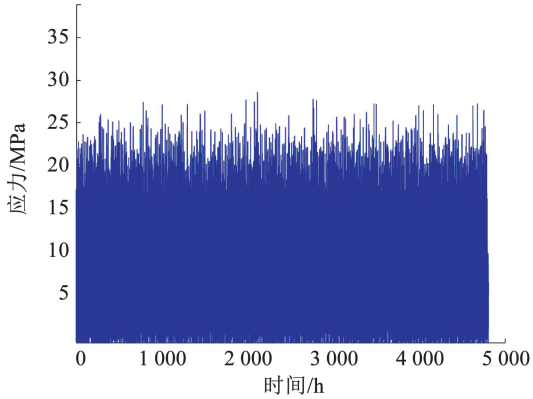
Fig. 16　Random traffic flow loading calculation process

2.6　斜拉索应力历程计算

在对各根斜拉索影响面进行计算后，则对斜拉索进行公路随机车流与列车荷载加载活载应力历程进行计算，计算时长为 1 a，共为 8 760 h，计算结果如图 17 所示仅展示 S1 与 M1 号斜拉索计算结果。



(a) S1号索应力历程



(b) M1号索应力历程

图 17　常泰长江大桥斜拉索活载应力历程

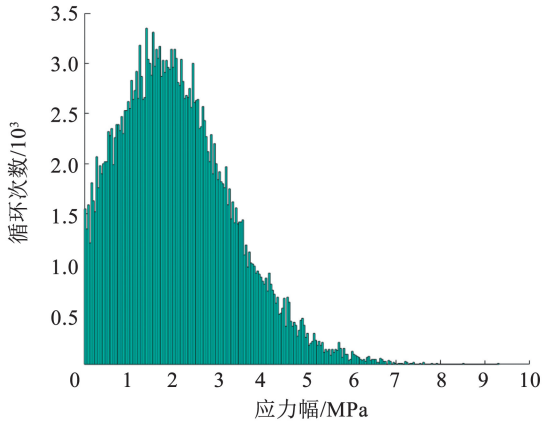
Fig. 17　The live load stress history of the inclined cables of Changtai Yangtze River Bridge

分析计算结果：1）根据不同斜拉索应力历程变化情况可知，斜拉索应力历程的变化规律与影响面规律类似，中跨斜拉索的应力数值整体高于边跨斜拉索，且长索的应力整体也高于短索。2）根据边跨与中跨对称位置斜拉索的应力水平可知，S1 号与 M1 号均为最靠近桥塔一侧的拉索，但 M1 号索的应力水平远远大于 S1 号拉索，同时，对比边跨与中跨斜拉索应力水平的变化情况可知，中跨斜拉索的应力水平变化相较边跨更为剧烈，因此在对斜拉桥进行设计与常规监测时，应充分考虑该点。

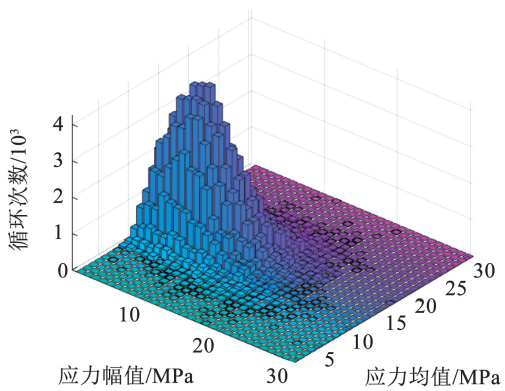
3　斜拉索疲劳荷载模型研究

3.1　等效应力幅分析计算

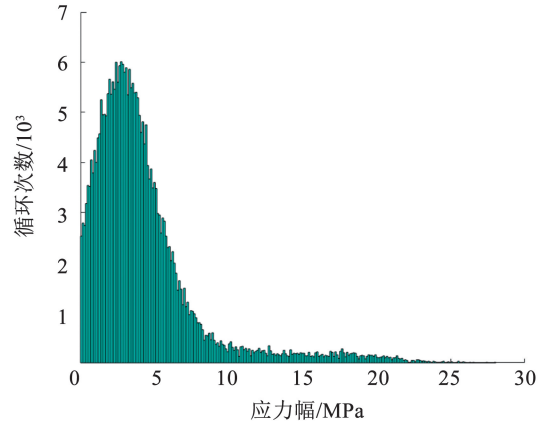
为了进一步分析斜拉索的疲劳效应，利用雨流计数法进行疲劳应力谱的计算，此处仅列出 S1 及 M1 计算结果，如图 18 所示。



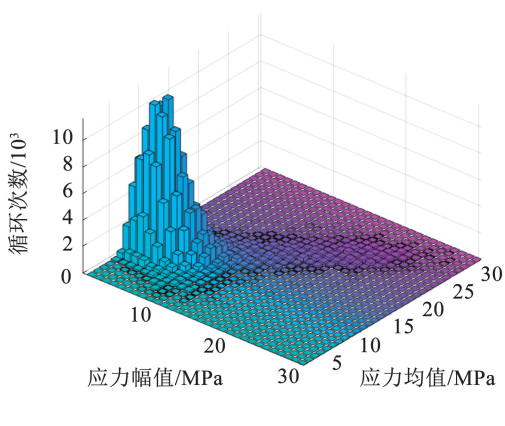
(a) S1号索疲劳应力谱



(b) S1号索疲劳应力谱雨流计数



(c) M1号索疲劳应力谱



(d) M1号索疲劳应力谱雨流计数

图 18 常泰长江大桥斜拉索疲劳应力谱及雨流计数

Fig. 18 Fatigue stress spectrum and rainflow counting of the inclined cables of Changtai Yangtze River Bridge

为了方便对斜拉索疲劳效应分析,将变幅应力循环变为常幅应力循环。有学者指出,对于公铁两用桥梁,公路荷载部分所产生的疲劳损伤相对于铁路荷载部分很小[26]。但本文认为,对于疲劳损伤,公路荷载的加入,将会使得疲劳应力幅大于仅有铁路荷载作用时的情况。为了验证这一观点,本文在进行等效应力幅计算时,将公路随机车流与调研所得列车荷载共同作用的等效应力幅与仅有列车荷载加载时的等效应力幅分别进行对比计算。在对公铁两用桥梁进行疲劳计算时,应分别对两种效应考虑 1.2 倍的调整系数再进行叠加,为了准确对比公路随机车流以及列车荷载同时加载与仅有列车荷载加载的情况,对于后者也考虑调整系数进行计算,结果见表 10,其中,$\Delta\sigma_{ec}$ 为公路随机车流与列车荷载共同作用,$\Delta\sigma_{e}$ 为铁路列车荷载作用。

表 10 随机车流与铁路荷载等效应力幅对比计算

Tab. 10 Comparison calculation of equivalent stress amplitude between random traffic flow and railway load

吊索编号	$\Delta\sigma_{ec}$/MPa	$\Delta\sigma_{e}$/MPa	相对误差/%
S1	2.889 7	1.176 0	59.30
S13	6.533 6	5.339 5	18.28
S26	9.435 5	7.449 9	21.04
S39	10.488 7	7.973 6	23.98
M1	8.081 4	5.973 2	26.09
M13	13.736 3	11.005 1	19.88
M26	14.593 3	12.013 4	17.68
M39	7.032 9	0.871 2	87.61

结果表明,各根斜拉索等效应力幅的变化规律与影响面及应力历程变化规律相似,但对于 M39 号斜拉索也出现了等效应力幅降低的情况,其原因与应力历程数值的降低有关。M13 号索与 M26 号索在公路随机车流与列车荷载下的等效应力幅最大,说明这两根索可能会较早发生疲劳破坏,应在日常监测中加强对 M13 与 M26 号索的观察。

通过对比公路随机车流以及列车荷载共同作用的情况与仅有铁路荷载作用情况下所计算出的等效应力幅可知:两者存在较大的差异,平均误差达到了 34.23%。其中,M26 号斜拉索误差最小,为 17.68%;而 M39 号斜拉索相对最大,甚至达到了 87.61%。说明在对公铁两用桥梁进行疲劳效应分析时,公路荷载部分对疲劳损伤的影响也不能被忽视,因此在后续分析中将公路荷载部分的疲劳荷载模型作为主要研究对象进行研究,而铁路部分由于荷载情况较为固定,随机性较低,可将调研得出的荷载形式,作为常泰长江大桥铁路部分的列车疲劳荷载模型。

深入研究公路部分荷载疲劳荷载模型,仅计算公路随机车流作用下等效应力幅,计算结果见表 11。此时,可定义 200 万次的疲劳应力循环作用所对应的等效疲劳应力幅的标准值 $\Delta\sigma_{e,k}$,计算公式可表示为

$$\Delta\sigma_{e,k}=\sqrt[m]{\frac{T\times n\times\Delta\sigma_{e}^{m}}{2\times10^{6}}} \tag{2}$$

式中:m 为 S-N 曲线的斜率的负倒数,对于斜拉索可取 3.5[18];T 为设计使用年限,其值取 100 ;n 为循环次数;$\Delta\sigma_{e}$ 为等效疲劳应力幅值依据该式。各根斜拉索的等效应力幅标准值计算结果见表 11。

表 11 公路车流作用下等效应力幅及其标准值

Tab. 11 Equivalent force amplitude and standard value under the action of highway traffic flow

吊索编号	$\Delta\sigma_{e}$/MPa	$\Delta\sigma_{e,k}$/MPa
S1	2.566 8	8.939 6
S13	3.859 2	13.440 8
S26	3.660 1	12.747 4
S39	3.941 5	13.727 4
M1	4.300 2	14.976 7
M13	4.651 0	16.198 5
M26	4.066 4	14.162 2
M39	2.767 6	9.639 0

3.2　公路疲劳荷载模型研究

利用与规范相同的计算方法来编制疲劳荷载谱，在所有的车流数据中忽略车重小于 3 t 的车辆，计算出 5 种车型的等效车辆模型及损伤贡献率，得到疲劳荷载谱如表 12 所示。

表 12　常泰长江大桥公路疲劳荷载谱

Tab. 12　Fatigue load spectrum of Changtai Yangtze River Bridge Highway

车型	总重/kN	损伤贡献率/%	比例/%	轴距/m	轴重/kN
2 轴车	167.2	1.46	34.44	轴距 1:4.5	轴 1:60.6 轴 2:106.6
3 轴车	267.6	1.66	7.52	轴距 1:2.62 轴距 2:4.46	轴 1:63.2 轴 2:66.5 轴 3:137.9
4 轴车	362.2	7.78	12.23	轴距 1:2.74 轴距 2:6.22 轴距 3:1.40	轴 1:69.5 轴 2:94.8 轴 3:98.1 轴 4:99.8
5 轴车	390.0	6.90	8.38	轴距 1:3.49 轴距 2:6.12 轴距 3:2.58 轴距 4:1.33	轴 1:68.2 轴 2:110.1 轴 3:73.9 轴 4:68.8 轴 5:69.0
6 轴车	516.1	82.20	37.43	轴距 1:3.19 轴距 2:1.46 轴距 3:6.66 轴距 4:1.32 轴距 5:1.32	轴 1:65.2 轴 2:90.2 轴 3:90.1 轴 4:97.8 轴 5:84.9 轴 6:87.9

依据计算结果，6 轴车在疲劳荷载谱中占比最大，达到了 37.43%，同时 6 轴车的损伤贡献率也最大，达到了 82.20%，因此可将 6 轴车作为标准疲劳车模型。为便于计算，对 6 轴车的参数进行取整，总重为 520 kN，具体的疲劳车荷载形式如图 19 所示。

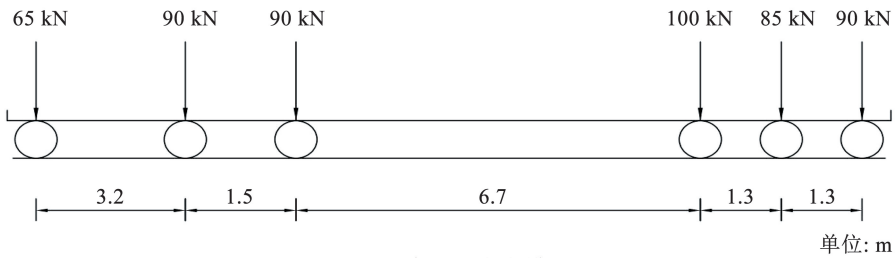


图 19　标准疲劳车模型

Fig. 19　Standard fatigue car model

3.3　公路疲劳荷载谱计算验证

依据欧洲 EN1-2 规范中利用疲劳荷载谱计算疲劳效应的方法，来对所编制的疲劳荷载谱进行计算验证，当一段车流经过桥面时所造成的总损伤可视作每一辆车单独经过桥面时所造成疲劳损伤之和。

根据疲劳荷载谱来计算疲劳作用的步骤通常如下：1）根据统计信息确定出每车道的单日车辆通行量；2）对每种车型单独经过桥面上某条车道时斜拉索的应力历程进行计算，以此来确定单车通过各条车道时所产生的循环次数以及应力幅；3）根据每条车道的日均通行量以及各车型比例获得每条车道各类车型在设计使用年限的总通行量，随后确定每种车型在各条车道上作用的总计应力循环次数，并按

照步骤 2 中的方式来计算出每种车型所产生的应力幅,计算出在整个设计使用年限的应力谱;4)将变幅应力历程转化为常幅应力历程的方法,计算出等效应力幅 $\Delta\sigma_e$,将等效应力幅的标准值定义为 200 万次疲劳循环次数所对应的应力幅,其公式可表达为

$$\Delta\sigma_{e,k}=\sqrt[m]{\frac{\mathrm{ADTT}_{sl}\times a\times 365\times T\times n\times\Delta\sigma_e^m}{2\times 10^6}} \quad (3)$$

式中:ADTT_{sl}为平均每条车道的单日通行量;a 为车道数;T 为结构设计使用年限;n、$\Delta\sigma_e$ 分别为车辆经过时应力循环的次数及其幅值;m 为 S-N 曲线的斜率的负倒数,对于斜拉索可取 3.5。

为对疲劳荷载谱进行验证,对基于疲劳荷载谱与列车荷载共同加载的等效应力幅进行计算,并和随机车流与列车荷载共同加载的计算结果对比计算结果见表 13。其中,$\Delta\sigma_{ec}$为实际随机车流作用的等效应力幅,$\Delta\sigma'_{ec}$为疲劳荷载谱作用所计算得的等效应力幅。

表 13 基于疲劳荷载谱的等效应力幅

Tab. 13 Equivalent stress amplitude based on fatigue load spectrum

吊索编号	$\Delta\sigma_{ec}$/MPa	$\Delta\sigma'_{ec}$/MPa	$\Delta\sigma'_{ec}/\Delta\sigma_{ec}$
S1	2.889 7	3.323 2	1.15
S13	6.533 6	6.960 9	1.07
S26	9.435 5	10.443 3	1.11
S39	10.488 7	11.477 4	1.09
M1	8.081 4	8.518 8	1.05
M13	13.736 3	15.384 6	1.12
M26	14.593 3	17.803 8	1.22
M39	7.032 9	8.228 5	1.17

由计算结果可得,疲劳荷载谱所计算得的等效应力幅约为随机车流加载的 1.12 倍,说明所编制的疲劳荷载谱准确性较高,且两种方法均能够反应出不同斜拉索疲劳作用的变化规律。依据美国 AASHTO 规范,高强钢绞线在经历 200 万次疲劳应力循环时所容许的应力幅值为 124 MPa,远远大于计算结果,可认为该斜拉桥的各根斜拉索具有良好的疲劳性能。

4 结 论

本文基于实测车流数据,采用有限元仿真与理论计算相结合的方式,对常泰长江大桥斜拉索的疲劳荷载模型展开了研究,得到的如下研究结论:

1)中跨斜拉索的应力历程数值整体高于边跨斜拉索,长索的应力历程整体高于短索,且中跨不同斜拉索之间的应力变化较边跨更为剧烈,应在斜拉索的设计与常规监测中考虑这一现象。

2)所选取的 8 根斜拉索等效应力幅的变化规律与应力历程变化规律大致相同,且在所挑选的 8 根斜拉索中 M13 号与 M26 号的等效应力幅最大,需在桥梁的常规监测中加强对其观察。

3)公路随机车流与铁路列车荷载作用下以及仅有铁路列车荷载作用下斜拉索的等效应力幅平均相差 34.23%,对于公铁两用桥梁而言,在进行疲劳计算时,公路荷载对于疲劳效应的影响不可忽略。

4)编制出公路疲劳荷载谱,并从中选取出标准疲劳车模型,公路疲劳荷载谱与公路随机车流两种方式均能够反应不同斜拉索的疲劳变化规律,计算结果表明常泰长江大桥所有斜拉索的疲劳性能较为良好。

参考文献

[1]李岩, 崔石林, 陈逸民. 考虑模态更新的断索作用下斜拉桥动力响应分析方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2024, 56(3): 1
Li Yan, Cui Shilin, Chen Yimin. Research status and development of state evaluation of long span cable supported bridges considering modal updating and dynamic response analysis method of cable stayed bridges under the action of broken cables[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2024, 56(3): 1

[2]黄侨, 任远, 许翔, 等. 大跨径缆索承重桥梁状态评估的研究现状与发展[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(9): 1
Huang Qiao, Ren Yuan, Xu Xiang, et al. Research status and development of state evaluation of long span cable supported bridges [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(9): 1

[3]郁胜. 公路桥梁监测数据孪生车流和温度作用模型与疲劳评估方法[D]. 大连: 大连理工大学, 2023
Yu Sheng. Twin traffic flow and temperature effect model and fatigue assessment method for monitoring data of highway bridges[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2023

[4]吕志林, 姜旭, 强旭红, 等. 钢箱梁斜拉桥等效疲劳车辆荷载模型分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(6): 2197
Lü Zhilin, Jiang Xu, Qiang Xuhong, et al. Analysis of equivalent fatigue vehicle load model for steel box girder cable-stayed bridge [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2023, 54(6): 2197

[5]郭雪莲, 黄平明, 韩万水, 等. 基于特征熵权与样本加权的大跨桥梁多车道交通荷载聚类模型[J]. 中国公路学报, 2022, 35(10): 183
Guo Xuelian, Huang Pingming, Han Wanshui, et al. Multi lane traffic load clustering model for large-span bridges based on feature entropy weight and sample weighting[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(10): 183

[6]Fisher J W, Mertz D R, Zhong A. Steel bridge members under variable amplitude, long life fatigue loading[R]. Washington DC: Transportation Research Board, 1983

[7]Schilling C G. Stress cycles for fatigue design of steel bridges[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1984, 110(6): 1222

[8]Raju S K, Moses F, Schilling C G. Reliability of calibration of

fatigue evaluation and design procedures[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1990, 116(5): 1356

[9] Gagarin N, Albrecht P, Bosch H. Predicting fatigue life of highway bridges with weight-in-motion data[C]//Proceedings of the 3rd international workshop on bridge rehabilitation. Washington DC: Transport Research Laboratory, 1992: 14

[10] Laman J A, Nowak A S. Fatigue-load models for girder bridges[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1996, 122(7): 726

[11] Chotickai P, Bowman M D. Truck models for improved fatigue life predictions of steel bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, ASCE, 2006, 11(1): 71

[12] Przemyslaw R. WIM based load models for bridge serviceability limit states[D]. Nebraska: University of Nebraska, 2011

[13] 肖鑫，刘晓光，赵欣欣，等. 基于实测数据的铁路钢桥列车荷载模型研究[J]. 桥梁建设，2017，47(6)：60
Xiao Xin, Liu Xiaoguang, Zhao Xinxin, et al. Research on train load model of railway steel bridge based on actual measurement data[J]. Bridge Construction, 2017, 47(6): 60

[14] 肖鑫，赵欣欣. 基于实测荷载的铁路钢桁梁桥疲劳可靠性评估[J]. 计算力学学报，2020，37(2)：254
Xiao Xin, Zhao Xinxin. Fatigue reliability assessment of railway steel truss bridge based on measured loads[J]. Journal of Computational Mechanics, 2020, 37(2): 254

[15] 晏铖，韩晓强，徐伟杰，等. 列车荷载作用下平行钢丝拉索疲劳寿命评估[J]. 铁道建筑，2022，62(3)：88
Yan Cheng, Han Xiaoqiang, Xu Weijie, et al. Assessment on fatigue life of parallel steel wire cable under train load[J]. Railway Engineering, 2022, 62(3): 88

[16] Froseth T G, Rönnquist A. Load model of historic traffic for fatigue life estimation of Norwegian railway bridges[J]. Engineering Structures, 2019, 200(24): 109626

[17] Croce P. Impact of road traffic tendency in Europe on fatigue assessment of bridges[J]. Applied Sciences, 2020, 10(4): 1389

[18] Mariia Z, Frøseth T G, Anders R. Train classification using a weigh-in-motion system and associated algorithms to determine fatigue loads[J]. Sensors, 2022, 22(5): 1772

[19] Maljaars J. Evaluation of traffic load models for fatigue verification of European road bridges[J]. Engineering Structures, 2020, 225(1): 111326

[20] Maljaars J, Verdenius S. Changes to the lambda model for fatigue loads on steel railway bridges in Europe[J]. CE/Papers, 2023, 6(3/4): 2534

[21] 曹珊珊，雷俊卿，黄祖慰. 大跨多线公铁两用斜拉桥索锚结构疲劳荷载效应[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2017，48(12)：8
Cao Shanshan, Lei Junqing, Huang Zuwei. Fatigue load effect of cable anchor structure for large-span multi line dual-use cable-stayed bridge[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2017, 48(12): 8

[22] 吴斌斌. 公铁两用斜拉桥钢索塔锚固构造疲劳性能研究[D]. 成都：西南交通大学，2022
Wu Binbin. Study on fatigue performance of steel cable tower anchorage structure for dual-use cable-stayed bridge[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022

[23] 朱志远. 公铁两用斜拉桥病害及拉索疲劳性能分析方法研究[D]. 南京：东南大学，2022
Zhu Zhiyuan. Research on defects of rail-roadcable-stayed bridge and analysis method of cable fatigue performance[D]. Nanjing: Southeast University, 2022

[24] JTG D60—2015 公路桥涵设计通用规范[S]. 北京：人民交通出版社，2015
JTG D60—2015 General code for design of highway bridges and culverts[S]. Beijing: People's Communications Publishing House, 2015

[25] 薛程. 江苏省高速公路桥梁汽车和疲劳荷载模型研究[D]. 南京：东南大学，2017
Xue Cheng. Research on automobile and fatigue load models for highway bridges in jiangsu province[D]. Nanjing: Southeast University, 2017

[26] 马林. 国产 1860 级低松弛预应力钢绞线疲劳性能研究[J]. 铁道标准设计，2000，20(5)：21
Ma Lin. Study on fatigue performance of domestically produced 1860 grade low relaxation prestressed steel strands[J]. Railway Standard Design, 2000, 20(5): 21